



C O L L E C T I O N
D I R I G É E P A R J E A N B O R N A R E L

G R E N O B L E

S C I E N C E S

L'AIR ET L'EAU

**Alizés, cyclones, Gulf Stream, tsunamis
et tant d'autres curiosités naturelles**

René MOREAU



L'AIR ET L'EAU

Grenoble Sciences

Grenoble Sciences est un centre de conseil, expertise et labellisation de l'enseignement supérieur français. Il expertise les projets scientifiques des auteurs dans une démarche à plusieurs niveaux (référé anonyme, comité de lecture interactif) qui permet la labellisation des meilleurs projets après leur optimisation. Les ouvrages labellisés dans une collection de Grenoble Sciences ou portant la mention « Sélectionné par Grenoble Sciences » (« *Selected by Grenoble Sciences* ») correspondent à :

- des projets clairement définis sans contrainte de mode ou de programme,
- des qualités scientifiques et pédagogiques certifiées par le mode de sélection (les membres du comité de lecture interactif sont cités au début de l'ouvrage),
- une qualité de réalisation assurée par le centre technique de Grenoble Sciences.

Directeur scientifique de Grenoble Sciences

Jean BORNAREL, Professeur à l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1

On peut mieux connaître Grenoble Sciences en visitant le site web :

<http://grenoble-sciences.ujf-grenoble.fr>

On peut également contacter directement Grenoble Sciences :

Tél (33) 4 76 51 46 95, e-mail : grenoble.sciences@ujf-grenoble.fr

Livres et pap-ebooks

Grenoble Sciences labellise des livres papier (en langue française et en langue anglaise) mais également des ouvrages utilisant d'autres supports. Dans ce contexte, situons le concept de **pap-ebooks** qui se compose de deux éléments :

- un **livre papier** qui demeure l'objet central avec toutes les qualités que l'on connaît au livre papier
- un **site web corrélé** ou **site web compagnon** qui propose :
 - des éléments permettant de combler les lacunes du lecteur qui ne posséderait pas les prérequis nécessaires à une utilisation optimale de l'ouvrage
 - des exercices de training
 - des compléments permettant d'approfondir, de trouver des liens sur internet, etc.

Le livre du pap-ebook est autosuffisant et nombreux sont les lecteurs qui n'utiliseront pas le site web compagnon. D'autres pourront l'utiliser et ce, chacun à sa manière. Un livre qui fait partie d'un pap-ebook porte en première de couverture un logo caractéristique et le lecteur trouvera le site compagnon du présent livre à l'adresse internet suivante :

<http://grenoble-sciences.ujf-grenoble.fr/pap-ebooks/moreau>

Grenoble Sciences bénéficie du soutien du

Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et de la **Région Rhône-Alpes**.

Grenoble Sciences est rattaché à l'**Université Joseph Fourier de Grenoble**.

ISBN 978 2 7598 0828 1

© EDP Sciences 2013

L'AIR ET L'EAU

**Alizés, cyclones, Gulf Stream, tsunamis
et tant d'autres curiosités naturelles**

René MOREAU

 **edp sciences**

17, avenue du Hoggar
Parc d'Activité de Courtabœuf - BP 112
91944 Les Ulis Cedex A - France

L'air et L'eau

Cet ouvrage, labellisé par Grenoble Sciences, est un des titres du secteur Sciences de la matière de la Collection Grenoble Sciences (EDP Sciences), qui regroupe des projets originaux et de qualité. Cette collection est dirigée par **Jean BORNAREL**, Professeur à l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1.

Comité de lecture de l'ouvrage :

- Jean BORNAREL, Professeur émérite à l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1
- Jean-Pierre HULIN, Directeur de recherche émérite CNRS, laboratoire Fluides, Automatique et Systèmes Thermiques, Orsay
- James LEQUEUX, Astronome émérite à l'observatoire de Paris
- Jean LILENSTEN, directeur de recherche CNRS, Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble
- Robert LUFT, Professeur retraité de l'Université de Nice Sophia Antipolis
- Jean-Yves MERINDOL, Directeur de l'ENS Cachan, Professeur à l'Université de Strasbourg
- José TEIXEIRA, Directeur de recherche CNRS, laboratoire Léon Brillouin, Paris

Cet ouvrage a été réalisé par Anne-Claire LECOMTE (www.studiographisme.fr).

L'illustration de couverture est l'œuvre d'Alice GIRAUD, d'après : des éléments fournis par l'auteur, des éléments et réalisations d'Alice GIRAUD ainsi qu'une photo de tornade (© Météo France/ Michel LUCIANI).

Autres ouvrages labellisés sur des thèmes proches (chez le même éditeur) :

La Turbulence (*M. Lesieur*) • Turbulence et déterminisme (*M. Lesieur en collaboration avec l'institut universitaire de France*) • La Cavitation. Mécanismes physiques et aspects industriels (*J. P. Franc et al.*) • Énergie et environnement. Les risques et les enjeux d'une crise annoncée (*B. Durand*) • L'énergie de demain (*Groupe Énergie de la Société Française de Physique Sous la direction de Jean-Louis Bobin, Elisabeth Huffer & Hervé Nifenecker*) • Les milieux aérosols et leurs représentations (*A. Mailliat*) • En physique, pour comprendre (*L. Viennot*) • Naissance de la Physique (*M. Soutif*) • L'Asie, source de sciences et de techniques (*M. Soutif*) • Du soleil à la terre. Aéronomie et météorologie de l'espace (*J. Liliensten & P.L. Blelly*) • Sous les feux du Soleil, vers une météorologie de l'espace (*J. Liliensten & J. Bornarel*) • Mécanique - De la formulation lagrangienne au chaos hamiltonien (*C. Gignoux & B. Silvestre-Brac*) • Problèmes corrigés de mécanique et résumés de cours. De Lagrange à Hamilton (*C. Gignoux & B. Silvestre-Brac*) • Introduction à la mécanique statistique (*E. Belorizky & W. Gorecki*) • Mécanique Statistique. Exercices et problèmes corrigés (*E. Belorizky & W. Gorecki*) • Description de la symétrie. Des groupes de symétrie aux structures fractales (*J. Sivardière*) • Symétrie et propriétés physiques. Des principes de Curie aux brisures de symétrie (*J. Sivardière*) • Magnétisme : I Fondements, II Matériaux (*Sous la direction d'E. du Trémolet de Lacheisserie*) • Spectroscopie de résonance paramagnétique électronique, fondements (*P. Bertrand*) • Spectroscopies infrarouge et Raman (*R. Poilblanc & F. Crasnier*) • La Mécanique Quantique. Problèmes résolus, Tome I et II (*V.M. Galitski, B.M. Karnakov & V.I. Kogan*) • Physique des diélectriques (*D. Gignoux & J.C. Peuzin*) • Physique des plasmas collisionnels. Applications aux décharges hautes fréquences (*M. Moisan & J. Pelletier*) • Physique et Biologie (*B. Jacrot*) • Éléments de Biologie à l'usage d'autres disciplines, de la structure aux fonctions (*Philippe Tracqui & Jacques Demongeot*) • Sciences expérimentales et connaissance du vivant. La méthode et les concepts (*Pierre Vignais & Paulette Vignais*) • La biologie des origines à nos jours (*Pierre Vignais*) •

et d'autres titres sur le site internet :

<http://grenoble-sciences.ujf-grenoble.fr>

Guide de lecture

Comme tous les pap-ebooks de la collection Grenoble-sciences, cet ouvrage comporte à la fois un livre, qui peut se lire seul, de façon autonome, et le site web qui lui est associé pour l'étayer et le compléter. Le **livre** lui-même a pour objectif principal de guider le regard du lecteur sur la plupart des phénomènes observables dans l'air et dans l'eau. Les chemins qui conduisent à leur compréhension y sont balisés, et les pas du lecteur le long de cet itinéraire sont illustrés par de nombreux exemples. Les explications détaillées, qui interrompraient la promenade, sont reportées sur le **site associé**. Toutefois, certaines notions que l'auteur estime indispensables pour la compréhension de phénomènes importants sont présentées dans des **encarts** spécialisés, insérés dans les premiers chapitres, comme des clés proposées au lecteur qui se sentirait arrêté devant des portes closes. Les **notes en bas de page** apportent aussi quelques compléments, toujours brefs, de nature étymologique, bibliographique, géographique, ou encore historique.

La compréhension approfondie de ces deux milieux, l'air et l'eau, exigerait de faire appel à toutes les disciplines scientifiques, et plus particulièrement à la mécanique des fluides. Or ce domaine n'est pas abordé dans le cursus scolaire et universitaire avant les programmes de la licence ou des classes préparatoires aux grandes écoles. L'auteur a néanmoins fait le pari de proposer dans ce livre un premier niveau d'explication accessible sans formation avancée. Les notions qui touchent à des aspects relativement subtils, comme les mécanismes des instabilités hydrodynamiques et de la turbulence, sont donc reportées dans une **annexe**, qui constitue une sorte de base commune aux huit chapitres du livre, elle aussi présentée sans équations ni concepts abstraits. Enfin, en raison de l'abondance du vocabulaire nécessaire pour décrire ces phénomènes, un **glossaire** assez détaillé est proposé, où le lecteur trouvera la signification de la plupart des termes scientifiques utilisés. Lors de sa première occurrence dans l'un des chapitres, dans l'épilogue, ou dans l'annexe, chaque mot du glossaire apparaît en couleur bleue, de façon à informer le lecteur qu'un commentaire sur sa signification est disponible à la fin du livre.

Le lecteur disposant d'une culture scientifique avancée, qui se sentirait dérouté par la brièveté de certaines explications, ou qui estimerait leur simplicité excessive, pourra rechercher des compléments sur le site associé. Leur lecture requiert une certaine pratique des démarches de la physique théorique, qui s'appuient sur les grands principes et font appel à des outils mathématiques comme les équations aux dérivées partielles et l'analyse vectorielle. Ils comprennent des rappels sur les bases utiles pour une compréhension approfondie, des justifications de lois physiques évoquées dans le livre, ainsi que des informations sur les techniques expérimentales.

<http://grenoble-sciences.ujf-grenoble.fr/pap-ebooks/moreau>

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier les étudiants, élèves ingénieurs, doctorants et collègues, qui, tout au long de ma carrière, m'ont poussé par leurs questions et leurs commentaires à rechercher des explications aussi simples que possible à tous les phénomènes observables dans les milieux fluides comme l'air, l'eau et bien d'autres encore. Ce sont eux qui, en m'amenant à réaliser que le comportement de ces fluides était descriptible avec les mots du langage courant, m'ont permis d'imaginer ce livre.

Mes remerciements vont aussi aux membres du comité de lecture. Leurs suggestions très constructives ont conduit à une réelle amélioration du manuscrit initial.

Je tiens également à remercier les personnes, les photographes, les entreprises et les organismes qui m'ont gracieusement fourni, ou qui m'ont aidé à obtenir, de nombreuses photographies et illustrations montrant à la fois des phénomènes naturels spectaculaires et des réalisations de grands ouvrages. Si la présentation de ce livre est relativement attrayante c'est grâce à leurs contributions.

Je suis particulièrement reconnaissant à l'équipe de Grenoble Sciences qui, sous la direction de Jean BORNAREL, a mis cet ouvrage sous sa forme définitive, ce qui n'était pas chose facile compte-tenu des encarts et des nombreuses figures. Notamment, Laura CAPOLO, Sylvie BORDAGE et Anne-Laure PASSAVANT, ainsi qu'Anne-Claire LECOMTE et Alice GIRAUD, ont fait preuve d'un réel professionnalisme et de beaucoup de patience à mon égard pendant les mois qui ont précédé la parution du livre et l'édition du site web associé.

Vj ku' r ci g' k p v g p v k p p c m (' i g h v ' d i r p m

Table des matières

Prologue.....	1
1. L'atmosphère au repos.....	5
1. Structure de l'atmosphère.....	7
2. Composition de l'atmosphère.....	13
3. Propagation des ondes dans l'atmosphère.....	21
3.1. Le son.....	21
3.2. La lumière.....	22
4. Thermique de l'atmosphère.....	28
Conclusion.....	34
2. L'atmosphère en mouvement.....	35
1. Circulation atmosphérique aux grandes échelles.....	37
1.1. Les alizés, la cellule de HADLEY et le <i>jet stream</i>	37
1.2. Cellules polaires et cellule de FERREL.....	44
2. Dépressions atmosphériques et cyclones.....	45
2.1. Formation et sens de rotation des dépressions atmosphériques.....	45
2.2. Structure quasi-bidimensionnelle des dépressions.....	54
2.3. Transit et énergie des dépressions.....	61
3. Phénomènes périodiques dans l'atmosphère.....	65
3.1. Les moussons.....	66
3.2. La cellule de WALKER.....	68
3.3. Vents thermiques, vents catabatiques et vents anabatiques.....	68
3.4. Ciels pommelés et ondes de relief.....	72
Conclusion.....	74
3. Les caprices de l'atmosphère.....	77
1. Naissance et évolution des orages et des tornades.....	79
1.1. Dynamique des formations orageuses.....	79
1.2. Formation des tornades.....	82
2. Signatures sonores et lumineuses des orages.....	89
2.1. Les éclairs.....	90
2.2. Le tonnerre.....	95
2.3. Les lueurs de la haute atmosphère.....	96
2.4. L'arc en ciel.....	98

3. Les diverses précipitations	100
4. Comment les prévisions météorologiques sont-elles élaborées ?	108
Conclusion	110
4. Plus lourds que l'air, comment peuvent-ils voler ?	113
1. Portance et traînée	115
1.1. La portance expliquée par le bilan des pressions	115
1.2. Présence d'un tourbillon autour d'une aile volante	118
2. Pourquoi les avions sont-ils aussi bruyants ?	126
3. Onde de choc et mur du son	129
Conclusion	132
5. La mer tranquille	133
1. La mer au repos	135
1.1. Premier aperçu panoramique	135
1.2. Pression, température et salinité des mers	138
1.3. La mer n'est ni plate ni ronde	143
2. Le son et la lumière dans l'eau de mer	146
3. La remarquable stabilité des navires	148
4. La circulation océanique globale	152
Conclusion	156
6. La mer qu'on voit danser	159
1. Les marées	161
2. Le phénomène <i>El Niño</i>	167
3. La houle et les vagues	170
3.1. Pourquoi et comment les vagues se propagent-elles ?	170
3.2. L'étonnante diversité des vagues	175
3.3. Vaguelettes et instabilités convectives sous la banquise	182
Conclusion	184
7. Fleuves et rivières	187
1. Les principales propriétés des grands fleuves	189
1.1. Longueur, profondeur et distribution de vitesse	189
1.2. Le régime uniforme	191
1.3. Les régimes non-uniformes	193
2. Courbes et méandres	201
3. Chutes et cascades	204
Conclusion	206

8. Lacs, retenues et grands ouvrages	207
1. Des marais aux retenues hydroélectriques.	209
2. Les grands barrages : adaptation au site et équilibre	215
3. L'aménagement des grands fleuves.	220
4. Structure générale d'un aménagement hydroélectrique	224
4.1. Haute chute dans un massif montagneux	224
4.2. Chute de hauteur moyenne.	228
4.3. Installations de basse chute	229
4.4. Autres aménagements.	230
5. Les grands ouvrages portuaires.	231
Conclusion.	235
Epilogue	237
1. Quelles inquiétudes et sur quoi sont-elles fondées ?	239
1.1. Pollution de l'air	240
1.2. Pollution du milieu marin.	242
1.3. Ressource en eau douce	244
2. Pour conclure notre promenade	245
Annexe - Instabilités et turbulence	247
1. Apparition soudaine d'un mouvement	250
1.1. Instabilité de RAYLEIGH-BÉNARD	250
1.2. Instabilité de RAYLEIGH-TAYLOR	253
2. Instabilité des interfaces cisailées ou instabilité de KELVIN-HELMHOLTZ	256
3. Autres structures tourbillonnaires courantes	260
4. Transition vers la turbulence	263
4.1. Apparition de la turbulence dans les écoulements non confinés.	263
4.2. Transition vers la turbulence dans les écoulements en conduites	265
4.3. Autres modes d'excitation de la turbulence	266
5. Turbulence pleinement développée.	267
5.1. La turbulence des écoulements les plus courants	267
5.2. La turbulence atmosphérique à grande échelle	268
5.3. La cascade inverse d'énergie en turbulence bidimensionnelle.	272
Conclusion.	275
Glossaire	277
Index	297

Vj ku' r ci g' k p v g p v k p p c m (' i g h v ' d i r p m

Prologue

*Le commencement de toutes les sciences,
c'est l'étonnement de ce que les choses sont ce qu'elles sont.*

(ARISTOTE)

Vj ku' r ci g' k p v g p v k p p c m (' i g h v ' d i r p m

L'air et l'eau sont les deux fluides essentiels à la vie. Depuis les premiers apprentissages de notre enfance, ils nous sont devenus tellement familiers que chacun croit les connaître. Et pourtant, qu'il est difficile d'en prédire le comportement, combien de questions se heurtent aux limites de nos connaissances ! Peut-on expliquer avec précision le vent, les orages et les tempêtes ? Pourquoi pleut-il ici et non pas là ? L'été prochain sera-t-il caniculaire ou, au contraire, fort agréable ? La mer sera-t-elle belle ou démontée ? D'où viennent donc ces vagues qui, sans cesse, viennent s'abattre sur nos rivages ?

Les ingénieurs et techniciens en formation, amenés à visiter de grands aménagements hydrauliques, portuaires ou aéroportuaires, ont l'occasion d'exercer leur regard sur ces milieux fluides toujours en mouvement. En comprenant de mieux en mieux l'origine des phénomènes, ils admirent de plus en plus le prodigieux spectacle de cette nature animée. Progressivement, leur intérêt croît et, en retour, leur compréhension des phénomènes cultive chez eux un réel désir de maîtriser les outils qui permettent de les analyser. En dehors des milieux scientifiques et techniques, cette attitude réjouit aussi tous les visiteurs de ces sites spectaculaires. Leurs accompagnateurs, habitués à expliquer la puissance d'une chute d'eau sans équation ni concept abstrait, sont amenés à les guider dans une démarche qui implique de regarder, voire d'observer, ce qui engage beaucoup plus et apprend bien davantage que de simplement voir.

Qu'il s'agisse de l'air ou de l'eau, la promenade proposée au lecteur commence par une présentation du milieu supposé au repos, puis se poursuit par l'examen de ses pulsions incessantes et difficilement prévisibles. D'abord centré sur les plus grandes échelles, celles de la planète entière, cet itinéraire mène ensuite vers des structures de moins en moins grandes, comme celles des dépressions atmosphériques, des nuages, de la pluie, ainsi que celles des marées et des vagues. Il conduit aussi le long de l'immense réseau de cours d'eau qui drainent et irriguent les continents, et donne l'occasion d'admirer de magnifiques ouvrages, comme les barrages construits au fil de l'eau, et de s'interroger à propos de leur impact sur les territoires voisins. L'idée centrale de ce livre consiste donc à observer des phénomènes naturels et à proposer des explications relativement simples adressées à un large public soucieux de son environnement.

La majeure partie du texte est accessible à des lecteurs ne disposant pas de connaissances plus avancées que celles du baccalauréat scientifique, pour qui des grandeurs comme la température du fluide, ou la pression au sein de ce milieu, sont déjà familières. Toutefois, l'explication de certains phénomènes requiert l'usage de

notions plus avancées et d'une formation universitaire. Pour ne pas interrompre la promenade, ces notions ont été isolées dans des encarts insérés dans les chapitres auxquels ils se rapportent. Le lecteur non initié devra passer outre, sans s'inquiéter, en admettant qu'il se prépare à acquérir ces notions à partir des exemples présentés. Pour répondre aux attentes de lecteurs possédant déjà une formation scientifique avancée, le site web compagnon de ce livre propose aussi quelques compléments : des justifications théoriques pour ceux qui aiment manipuler les équations, quelques informations sur les techniques expérimentales.

Dans le texte principal les équations sont donc abandonnées, mais quelques chiffres essentiels sont rappelés pour situer les ordres de grandeur des phénomènes discutés et mettre en place des repères utiles. À titre d'exemple, il est en effet important de réaliser que les temps caractéristiques des mouvements atmosphériques sont au plus de l'ordre de la semaine, alors que ceux de l'océan dépassent le millénaire : la grande circulation du *Gulf stream* met environ 1600 ans pour accomplir son tour du monde ! À propos des interactions entre l'atmosphère et l'océan, nous aborderons la météorologie et nous côtoierons le thème de la climatologie, objet de recherches importantes en période de réchauffement climatique. L'intention consiste à situer les bases scientifiques de ces grands défis, en les limitant à des aspects bien établis, mais sans entrer dans leur traitement détaillé.

En somme, j'aimerais laisser au lecteur l'impression que je lui raconte une belle histoire et lui transmettre une parcelle de mon émerveillement. De ce point de vue, qu'il me soit permis d'évoquer Jules VERNE, à mes yeux l'un des maîtres de l'attitude émerveillée devant la connaissance scientifique. Ses *Voyages extraordinaires* ont tellement intéressé l'enfant que j'ai été, que je souhaite citer les deux volumes les plus proches de l'objet de ce livre, auxquels sont empruntées les citations placées en exergue des chapitres 2 et 5 : *Cinq semaines en ballon* et *Vingt mille lieues sous les mers*. Sa vision relevait, certes, plus du rêve que de la compréhension scientifique proposée dans cet ouvrage. Puisse ce livre aider les lecteurs à poursuivre leurs propres démarches, mêlant éventuellement le rêve à la réalité, après avoir lu cette description raisonnée des phénomènes observables dans l'air et dans l'eau.

L'auteur

Chapitre 1

L'atmosphère au repos

L'air est plein du frisson des choses qui s'enfuient.

(Charles BAUDELAIRE, *Tableaux parisiens*)

Vj ku' r ci g' k p v g p v k p p c m (' i g h v ' d i r p m

La planète Terre a la forme d'une sphère légèrement aplatie aux pôles. Son rayon moyen est voisin de 6370 km et le périmètre équatorial est proche de 40000 km. L'atmosphère, remplie par ce merveilleux mélange gazeux que l'on appelle *l'air*, est son enveloppe externe où vit l'humanité accompagnée de très nombreuses espèces animales et végétales. Sans cesse, nous respirons cet air, nous nous y déplaçons, nos regards le traversent, et nous en acceptons les aléas météorologiques. Aussi familière qu'elle nous paraisse, aussi indispensable à la vie qu'elle soit, connaissons-nous vraiment cette atmosphère ? Pourtant, les informations recueillies au fil des siècles, devenues de plus en plus précises au cours de l'aventure aérospatiale, permettent maintenant de bien connaître ce milieu et d'en comprendre les principales propriétés. Engageons nous donc dans son observation, en nous limitant dans ce chapitre à une première approximation, celle d'une atmosphère au repos.

1. Structure de l'atmosphère

Les confins de l'atmosphère se perdent à très grande distance dans deux régions où la matière est tellement raréfiée, qu'il est souvent justifié de les considérer comme presque vides : la **magnétosphère** et l'**hétérosphère** (voir encart E1.1). Aussi éloignée soit-elle, la magnétosphère, dans laquelle se referment les lignes de flux du champ magnétique terrestre, n'est pas sans influence sur la Terre puisqu'elle constitue le bouclier qui la protège du rayonnement cosmique en provenance du soleil, incompatible avec la vie. Parce qu'elle est soufflée vers l'aval par le **vent solaire**¹, son épaisseur est très variable entre le côté jour, où elle atteint plusieurs milliers de kilomètres, et le côté nuit, où elle se referme à des distances beaucoup plus grandes dans le sillage engendré par la Terre au sein de ce vent solaire. Et l'hétérosphère, où les concentrations des diverses espèces deviennent extrêmement faibles, moins de 10^5 fois inférieures à leur concentration au sol, constitue la transition entre l'espace et la Terre

1 Le vent solaire est un flux de particules élémentaires émises par le soleil, essentiellement des protons et des électrons. L'énergie des particules les plus lourdes, les protons, est située dans une gamme allant de 100 eV, ce qui correspond à une vitesse d'environ 500 km s^{-1} , à 10 MeV, ce qui correspond à 50000 km s^{-1} . L'électron-volt (eV) est une unité d'énergie hors du système international, mais adaptée à la physique des particules élémentaires (1 eV est équivalent à $1,60217653 \times 10^{-19} \text{ J}$, 1 keV représente 10^3 eV , 1 MeV représente 10^6 eV). Les aurores boréales sont une manifestation de l'entrée dans l'atmosphère des très rares particules qui ont pu traverser la magnétosphère ; elles ne se produisent que dans les régions polaires où la direction du champ magnétique est presque perpendiculaire au sol.

- M**
- MACH (Ernst)..... 131
 cône de - 131
 nombre de - 131
 magnétosphère..... 7, 9
 Manche 137, 163, 166
 maquette..... 197
 marais..... 209
 marée 161, 165, 230
 marnage 163, 231
 mascaret..... 199
 masse 17, 40, 106
 - nuageuse..... 79
 méandre 201, 203
 mer..... 135, 161
 - Baltique 137
 - Caspienne..... 137
 - d'Aral 137
 - de Marmara..... 138
 - des Caraïbes 137
 - du Nord 137
 - Méditerranée..... 136, 145
 - Morte 137
 - Noire 137
 mésosphère 8, 19
 métacentre 151
 météorologie 108, 152
 méthane 240
 microcentrale 231
 MIE (Gustav)..... 24
 MILANKOVITCH (Milutin) 28
 cycle de - 28
 mode..... 173
 - principal..... 173
 moment
 - cinétique..... 39, 48, 50, 86, 273
 - dipolaire électrique 32
 monoxyde de carbone 241
 mousson..... 66
 - d'été..... 66
 - d'hiver 67
 mouvement 40
 quantité de - 50, 51
- N**
- navigation 223
 neige 103
 niveau
 - de la mer 143
 - moyen des océans 143
- nombre
 - d'AVOGADRO..... 106
 - de BOND..... 254
 - de FROUDE..... 196
 - de MACH..... 131
 - de RAYLEIGH 69, 250
 - de REYNOLDS..... 51, 55, 83, 120
 - de ROSSBY..... 57
 - de STROUHAL..... 263
- O**
- océan
 - Antarctique..... 136, 167
 - Arctique..... 136
 - Atlantique..... 136, 152, 163
 - Indien 136
 - Pacifique..... 136
 - Téthys 136
 onde..... 170
 - acoustique 21
 - de choc..... 95, 115, 129, 257
 - de gravité 171, 183, 193
 - de relief 72, 74
 - inertielle..... 56, 58, 262, 269
 longueur d' - 171, 181
 - solitaire 179
 - sonore 146
 - stationnaire..... 177
 orage..... 79, 81
 ordre de grandeur..... 16
 oxyde d'azote..... 241
 ozone 241
 couche d' - 18
- P**
- pale 197, 230
 panache..... 253
 Pangée 136
 paratonnerre..... 94
 période..... 162, 171, 173
 - propre 161
 photon 22, 32
 phytoplancton 148, 169
 pluie 101
 poids 40, 115
 pollution 239
 - de l'air 240
 - du milieu marin..... 242
 pont 197, 200, 233
 port..... 209, 231
 portance 40, 115, 132

- potentiel hydrogène 143
 poussée d'ARCHIMÈDE 38, 40, 115, 183
 précipitation 71, 100
 prévision météorologique 108, 110
 probabilité 110
 profondeur critique 194, 197
- Q**
- quantité
 - de chaleur 107
 - de mouvement 50, 106, 116, 174
- R**
- RAYLEIGH (John William Strutt) 24, 250
 - -BÉNARD 69, 250
 rayon 98, 99
 - infrarouge 23
 - ultraviolet 22
 rayonnement 9, 30, 80
 raz-de-marée 181
 réchauffement climatique 29, 166, 240
 référentiel 40
 - absolu 40
 - galiléen 40, 48
 réflexion 98
 réfraction 25, 27, 98
 indice de - 26
 régime
 - graduellement varié 194, 197
 - torrentiel 193, 199
 - uniforme 192
 ressaut 178, 197, 199, 257
 retenue 210, 212
 REYNOLDS (Osborne) 51, 265
 nombre de - 51, 55, 120, 128, 262
 rides capillaires 182
 risée 182
 rosée 102
 ROSSBY (Carl-Gustaf Arvid) 57
 nombre de - 57
 roue 210
 - à aubes 227
 rouleau 252
 roulis 149
 ruissellement 243
- S**
- salinité 138, 141, 154, 184
 sel marin 142
 serre
 effet de - 29, 32, 142, 240
- seuil 194, 197, 266
 similitude 196
 solaire
 irradiance - 28
 vent - 7
 Soleil 161
 soliton 179
 solstice 37, 164
 son 21, 146
 célérité du - 21, 126, 146
 mur du - 115, 131
 sonar 146
 sous-marin 149, 150
 spectre 22, 173
 - de raies 173
sprites 97
 statistique 110
 stratification 268
 stratopause 8
 stratosphère 8, 15
 structure
 - colonnaire 269
 - cyclonique 271
 - dendritique 103
 - quasi-bidimensionnelle 54
 - turbulente 269
 subsonique 131
 sulfure d'hydrogène 243
 supersonique 129, 131
 surfusion 102
 sylphe 97
- T**
- tangage 148
 TAYLOR (Sir Geoffrey Ingram) 60
 colonne de - 56, 60, 262, 266
 tensiomètre 104
 tension
 - de vapeur saturante 14, 61, 86
 - superficielle 105, 107, 182, 254
 tétrapode 233
 théorie cinétique des gaz 15, 17
 thermique
 - de l'atmosphère 28
 équilibre - 29
 vent - 68
 thermocline 140, 147, 167, 255
 tonnerre 89, 95
 tornade 79, 82, 87, 255
 torrentiel 193